心理学报 2020, Vol. 52, No. 8, 958−970
Acta Psychologica Sinica DOI: 10.3724/SP.J.1041.2020.00958

数学焦虑个体近似数量加工的神经机制：一项 EEG 研究

刘 洁[1,2,3] 李瑾琪[1,2] 申超然[4] 胡小惠[1,2]
赵庭浩[5] 关 青[1,2] 罗跃嘉[1,2,3]

([1]深圳大学脑疾病与认知科学研究中心; [2]深圳大学心理与社会学院; [3]深圳市神经科学研究院，深圳 518060)
([4]长治学院教育学院，山西 长治 046000) ([5]美国凯斯西储大学认知科学系，俄亥俄州克利夫兰)

摘 要 近似数量加工是对大数目物体数量在不依赖逐个数数前提下的估计。行为学研究提示高数学焦虑人群近似数量加工能力下降，但神经机制未明。本研究探讨高数学焦虑个体近似数量加工的神经机制，比较高低数学焦虑脑电活动的差异：(1)行为上无显著组间差异; (2)高数学焦虑组的 P2p 成分波幅增加; (3) δ 频段 ERS 及 β 频段 ERD 无显著数量比例效应，而低数学焦虑组在上述指标的数量比例效应显著。本研究为高数学焦虑人群近似数量加工能力下降提供了电生理学的证据。

关键词 数学焦虑; 近似数量系统; EEG; 时频分析
分类号 B845

1 引言

数学焦虑是对数学加工的不良情绪反应(Ashcraft, 2002)。数学焦虑的发生率高，影响范围广。根据经济合作与发展组织(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)的国际学生评估项目 PISA 2012 的统计结果，在参与调查的 65 个国家和地区中, 33%的 15 岁青少年报告在面临数学问题时感到无助(OECD, 2013)。

高数学焦虑个体在一般性的思维和认知任务中表现正常，但数学认知能力显著下降，包括计算、数学问题解决等复杂数学加工(如 Ashcraft & Krause, 2007)，还包括数量加工等基础数学加工(Lindskog, Winman, & Poom, 2017; Maloney, Risko, Ansari, & Fugelsang, 2010; Maloney, Ansari, & Fugelsang, 2011)。例如，一些研究发现高数学焦虑个体在符号表达的数量加工过程中不同于低数学焦虑个体(如 Dietrich, Huber, Moeller, & Klein, 2015; Malonely et al., 2010, 2011; Núñez-Peña & Suárez-Pellicioni, 2014)。Dietrich 等(2015)数字大小比较任务(如比较 1 和 2 哪个数更大)中，发现高数学焦虑组在行为上表现出更强的数字距离效应，即高低数学焦虑个体上存在难度与组别的交互作用：对于数字距离较大的条件(如 1 和 4)两组的行为表现差异较小，对于数字距离较小的条件(如 3 和 4)两组行为表现差异较大。Núñez-Peña 和 Suárez-Pellicioni (2014)采用数字大小比较任务(如比较 1 和 2 哪个数更大)，在行为指标和 EEG 波幅(200~250 ms，中线电极 Fz, Cz, Pz)都发现高数学焦虑组表现出更大的数字距离效应和数字大小效应。数字大小效应表现为，数量较大的数字的比较(如 9 和 10)相对于数量较小的数字的比较(如 1 和 2)难度更大，在高低数学焦虑个体上存在难度与组别的交互作用，数量较小的数字的比较的组间差异低于数量较大的数字的组间差异。更强的数字距离效应与数量大小效应均表明高数学焦虑个体的数量加工能力下降。

收稿日期: 2019-09-12
* 国家自然科学基金项目(31900779, 31871109)及深港脑科学创新研究院(2019SHIBS000)资助。
通信作者: 罗跃嘉, E-mail: luoyj@szu.edu.cn

为什么数学焦虑个体的数学能力下降？“干扰理论” (Disruption Account)认为高数学焦虑是由于短暂的认知资源的过度占用(主要是工作记忆的过度占用)，导致数学能力下降(Ashcraft & Kirk, 2001)。高数学焦虑个体在完成数学任务的同时还需要额外地处理焦虑带来的负性情绪，而数学任务常常依赖于工作记忆资源，情绪上的负担会影响工作记忆进而影响其完成数学任务的效率。另一种“能力减退理论” (Reduced Competency Account)认为高数学焦虑是直接由其低数学能力导致的(Carey, Hill, Devine, & Szücs, 2016; Maloney et al., 2010, 2011)。

近似数量加工能力是基本数量感知(Number Sense)能力的核心内容之一，是复杂数学加工如计算、推理等高级数学能力的基础，对数学学业成就也具有显著的预测作用(如 Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008)。作为一种非符号数量表征，从认知发展的角度，近似数量加工能力的发展先于语言和数字符号。动物和人类婴儿都具备对近似数量进行估计和比较的能力(Brannon, Jordan, & Jones, 2010; Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009; Xu, Spelke, & Goddard, 2005)。因此近似数量加工过程具有不受工作记忆的影响，且较少受教育文化因素干扰等特点(Sullivan, Frank, & Barner, 2016)。探讨数学焦虑个体的基础数学加工(如近似数量加工)的特点有助于理解其在高级数学加工(如计算、数学问题解决)上成绩下降的原因。

那么，数学焦虑个体的近似数量加工能力是否下降？当前行为研究的结果揭示高数学焦虑个体可能存在近似数量加工的问题。Lindskog 等(2017)发现近似数量加工能力受数学焦虑水平的影响：对 79 名健康大学生进行行为测试，采用相关分析与偏相关分析，发现在控制个体视觉扫描速度及一般智力的影响前后，个体数学焦虑水平与近似数量加工水平均呈显著负相关。但目前尚无探讨数学焦虑个体近似数量加工的神经机制的相关研究，本研究拟为此提供来自脑电(EEG)的证据。

P2p 成分被认为是近似数量加工的一个重要指标(Fornaciai, Brannon, Woldorff, & Park, 2017; Hyde, & Spelke, 2009, 2012; Libertus, Woldorff, & Brannon 2007; Park, DeWind, Woldorff, & Brannon, 2015)，是刺激发生后 200 ms 左右的正走向波。Libertu 等(2007)首先发现 P2p 波幅可以被非符号的数字距离大小所调节。他们让被试比较屏幕上呈现的点阵(大小在 1~4 和 6~9 之间)的数量与 5 的大小。屏幕上只呈现点阵，发现与 5 距离更大的点阵相比于距离小的点阵在 P2p 成分上诱发的波幅更大。Hyde 等(2009)采用适应范式(即被动观看任务)：首先序列呈现 4 张相同数量的点阵图，然后呈现一张相同或不同的数量的点阵图，并控制该图片与前 4 张图片数量的比例，被试只需认真观看屏幕上图片。该研究发现大脑枕区电极上的 P2p 成分的波幅会受到数量比例的调节。Hyde 等(2012)重复了这一发现，并通过溯源的方法将 P2p 成分定位在右侧顶内沟。Park 等(2015)更加系统地控制了点阵的其他视觉属性(如单个点的面积、点的稀疏度)，采用与 Hyde 等(2009)相同的适应范式，基于回归分析的方法发现顶枕区电极上的 P2p 成分波幅大小会受到数量变化的调节，同时该成分的波幅不受到其他视觉属性的调节。上述研究提示 P2p 波幅与近似数量加工的精确度有关，精确度越高 P2p 波幅越大。如果高数学焦虑个体存在近似数量加工表征的问题，则可预期高低数学焦虑个体的 P2p 波幅显著高于低数学焦虑个体。

除了锁时锁相的事件相关电位(Event-related Potential, ERP)之外，大脑的神经振荡也为控制神经元的放电时间提供一种有效的度量指标(Engel & Fries, 2010)。从方法学上讲，时频分析可以用来评估与事件相关的神经振荡信息，揭示与刺激呈现锁时的 EEG 节律能量变化，从而推测这些 EEG 活动的能量变化所反映的神经元节律性的调整过程(兴奋或抑制)。时频分析是一种揭示事件相关神经振荡的常用方法，目前已有两项探讨近似数量加工神经振荡特点的相关研究。例如, Libertus 和 Brannon (2009)发现 7 个月大的婴儿在观看点阵图片时, α 频段(8~12 Hz)和 θ 频段(4~6 Hz)的神经振荡强度在新异点阵和熟悉点阵间变化时会产生变化，且 α 频段神经振荡强度可受新异点阵和熟悉点阵间数量大小的比例调节；Park (2018)采用稳态视觉诱发电位技术(Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP)，以 8 Hz 的频率呈现点阵，并以 1 Hz 的频率改变点的数量、大小、稀疏程度等变量，结果发现在 1 Hz 频率(δ 频段, 1~3 Hz)下, 3~10 岁的儿童被试和成年被试观看点阵所诱发的神经振荡强度会被点的数量变化所调节，而不被点的其他视觉属性(点的面积、稀疏度等)的变化所调节，该研究说明 δ 频段的神经振荡频率可被近似数量加工中的数量比例所调节，而不受其他视觉属性的影响，而 Libertus 等

(2009)中 α 频段的显著作用可能是由点阵的视觉属性而不是数量属性导致的。我们假设，如果特定频段 EEG 振荡的能量能被数量所调节，且高数学焦虑个体存在近似数量加工能力下降，则可能观察到高低数学焦虑个体在该频段的振荡能量上存在差异。

综上，来自脑电研究的证据表明 P2p 成分与近似数量加工密切相关，且低频段的神经振荡强度也可被近似数量加工所调节(Fornaciai et al., 2017; Hyde et al., 2009, 2012; Libertus et al., 2007, 2009; Park et al., 2015; Park, 2018)。本研究通过认知行为测验，匹配高低数学焦虑两组被试的基础视觉加工速度、视觉注意能力、智力等一般认知能力及一般性焦虑水平，并分别记录了高低数学焦虑个体在完成近似数量加工任务时的脑电信号，之后对其进行时域和频域分析。我们假设：如果高数学焦虑个体存在近似数量加工能力下降，则可预期高低数学焦虑个体 P2p 成分的平均波幅存在显著差异，并且高低数学焦虑个体在低频段的神经振荡上也存在显著差异。

2 方法

2.1 被试

通过 G*power 3.1 计算(Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007)，探测重复测量方差分析中的被试间、被试内及其交互作用，使其统计检验力达到 0.7 及中等效应量(r = 0.25)需要的总样本数为 64，每组 32 人。我们招募了 62 名大学生被试参与了 EEG 实验。被试是来自 35 个不同专业的本科生。数学焦虑分组通过中文版数学焦虑量表(Mathematics Anxiety Rating Scale, MARS)得分来确定。在所有参与量表填写的被试中(N = 341)，选取百分等级为 80%以上的被试为高数学焦虑组，选取百分等级在 20%以下的被试作为低数学焦虑组。同时匹配两组被试在一般性焦虑水平、视觉加工速度、视觉注意广度及智力测验上的平均成绩，保证 3 个测验在两组被试间平均成绩无显著差异。由此得到高数学焦虑组被试 31 名，低数学焦虑组被试 31 名。其中 1 名被试因故未完成实验，1 名被试因 EEG 数据噪音过太大而删除，留下 31 名高数学焦虑被试和 29 名低数学焦虑被试。

被试人口学信息及认知测验成绩见表 1。高低数学焦虑得分差异显著，$t(58)$ = 29.07, p < 0.001, Cohen’s d = 1.39；一般性焦虑得分差异不显著，$t(58)$ = 0.20, p = 0.84。实验开始前被试填写知情同意书。

2.2 被试分组及筛选的材料、任务及程序

确定入组被试的流程是：首先有高低数学焦虑各 40 名在在线心理学实验平台上(www.dweipsy.com/lattice, Zhou, Wei, Zhang, Cui, & Chen, 2015)完成了非言语矩阵推理、快速视知觉图形匹配、视觉搜索三个测验(见图 1)，该平台同时记录被试的反应时和准确率，被试在开始正式测验前进行充分的练习。完成后从中分别挑选 31 名被试进入高低数学焦虑组，挑选标准是两组被试间在三项测验的平均得分上均无显著的组间差异(各组平均得分见表 1)。

2.2.1 数学焦虑量表及一般性焦虑量表

采用中文版数学焦虑量表(MARS)评估被试的主观数学焦虑水平，共 25 题。该量表翻译自英文版的简略数学焦虑量表(Alexander & Martray, 1989)，由两名心理学专业研究生分别对 MARS 进行单独翻译，对比两份译稿形成统一的中文版的 MARS。呈现可能导致数学焦虑的情境(例如，想象即将到来的数学考试)来衡量数学焦虑的强度。要求被试在 5 分里克特量表上从 1 分(无焦虑)到 5 分(高度焦虑)做出反应，以表明他们对情况的感受。用测验总分表示数学焦虑的水平。MARS 的分半信度为 0.83，克隆巴赫系数(Cronbach α)为 0.79。被试的一般性焦虑水平通过特质焦虑量表(STAI-T; Spielberger, Gorsuch, Lushene, Vagg, & Jacobs, 1983)进行评估，特质焦虑量表共 20 题，分半信度为 0.88，克隆巴赫

表 1 高低数学焦虑组的年龄、性别、数学焦虑、一般焦虑、视觉加工速度、视觉注意广度及的平均得分及标准差

组别	年龄(岁)	性别(男/女)	数学焦虑	一般焦虑	视觉加工速度	视觉注意广度	智力
高数学焦虑 (High math anxious, HMA)	20.68 (1.62)	15/16	94.35 (7.37)	44.70 (5.35)	74.06 (17.24)	58.71 (18.78)	5.03 (1.38)
低数学焦虑 (Low math anxious, LMA)	20.69 (1.85)	17/12	41.86 (6.56)	44.45 (4.84)	75.86 (16.19)	63.96 (18.91)	5.14 (0.88)
t	—	—	29.07	0.2	−0.42	−1.08	−0.35
p	—	—	<.001	0.84	0.68	0.28	0.72

注：括号中为标准差

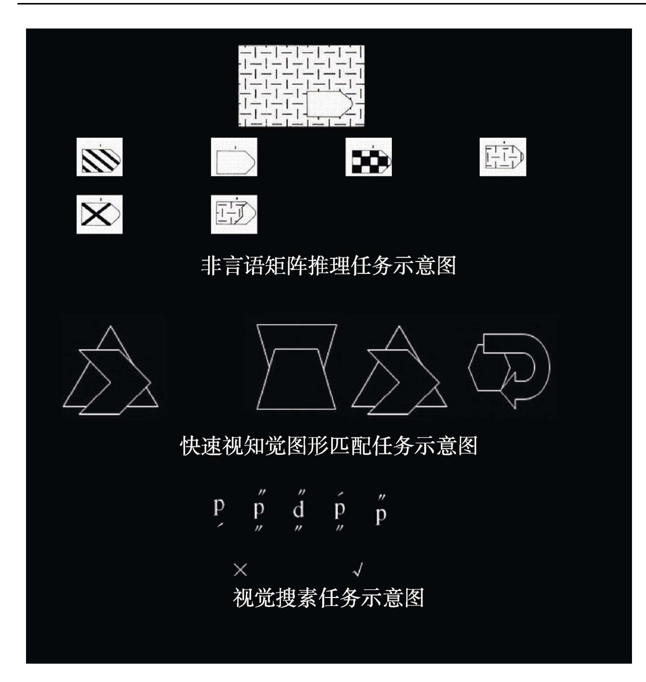


图 1　各项认知测验任务示意图

系数(Cronbach α)为 0.85。

2.2.2　非言语矩阵推理

非言语矩阵推理测试是基于 Raven 的标准渐进矩阵(Raven, Raven, & Court, 1998)设计的，用于评估一般智力。在这项测试中，要求被试根据图片的固有规则识别图像中缺失的部分。有 6 到 8 个候选答案。被试使用鼠标选择丢失的部分。将被试的标准 9 分记为最终成绩。本测验分半信度为 0.81，克隆巴赫系数(Cronbach α)为 0.56。

2.2.3　快速视知觉图形匹配

本测验改编自 Ekstrom, French 和 Harman (1976)认知测验手册中的图片辨别测验(Ekstrom et al., 1976)，旨在考查被试的快速视觉加工能力。该测验为非限时测验，由 120 个不规则图形组成 120 道题目，分 3 段完成，每部分包括 40 道题目，中间给被试足够时间休息，要求被试完成全部题目。每道题包括左边一个目标图片和右边 3 个选择图片，同时出现在屏幕中央，持续 400 ms。间隔 1000 ms 黑屏后出现下一道题目。要求被试又快又准地完成所有题目。将被试累计回答正确的个数记为最终的成绩。本测验分半信度为 0.92，克隆巴赫系数(Cronbach α)为 0.93。

2.2.4　视觉搜索

视觉搜索任务 D2 改编自 Bates 等人视觉注意测验(Bates & Lemay, 2004)。要求被试仔细扫描每一行字符，找到字符中有带有两条短线的 d，这两条短线可以在一起，也可以是分开的。如果图中有带两条短线的 d 就按 P 键，没有就按 Q 键。本测验共 240 个试次，要求被试又快又准地完成所有题目。将被试累计回答正确的个数记为最终的成绩。本测验分半信度为 0.97，克隆巴赫系数(Cronbach α)为 0.89。

2.3　EEG 实验材料、任务、程序

以往探讨近似数量加工过程的神经机制时通常使用主动的数量加工(例如 Libertus et al., 2007)和被动的数量加工(例如 Libertus et al., 2009 中的适应任务)两种范式，本研究也囊括了主动和被动数量加工两种任务。在主动数量加工任务中，要求被试判断刺激图片中是黄点多还是蓝点多；在被动数量加工任务中，为了让被试保持警觉，要求被试判断刺激图片中的唯一的正方形是黄色还是蓝色(见图 2)。

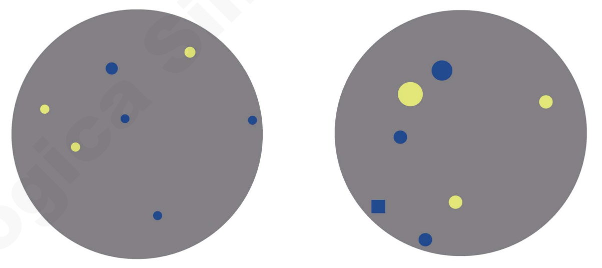


图 2　两种任务的刺激示例

实验中，被试坐在距离屏幕 80 cm 的位置平视电脑屏幕。任务呈现的程序使用 E-prime 2.0 (Psychology Software Tools Inc., Sharpsburg, PA, USA)编写。在每个试次中，首先在屏幕正中间呈现一个红色的“+”或“■”的提示 800 ms，如果呈现红色提示“+”，被试需完成主动数量加工任务，如果呈现红色“■”，被试需完成被动数量加工任务。1500 ms 的空屏之后呈现图片刺激，图片刺激呈现时长为 300 ms 以防止被试用数数策略，然后呈现 2000 ms 的空屏，被试按“F”、“J”键进行反应，试次间隔时间在 500~2000 ms 中随机。所有呈现条件在被试内平衡，反应手在被试间平衡。实验共分为 4 个 block，每个 block 结束后有短暂休息时间。每个 block 中有 96 个试次，每 4 个试次组合成一个小 block，在小 block 内的 4 个试次是同类型的任务，即同样为主动数量加工任务或同样为被动数量加工任务，在小 block 之间的试次是不同类型的任务。小 block 的呈现顺序是随机的，不同的条件在小 block 及大 block 内平衡。正式实验前，让被试进行充分的练习，熟

悉任务之后再进行正式实验。

实验材料是 384 张点阵图片，主动数量加工和被动数量加工任务各 192 张。主动数量加工任务的实验材料主要由黄色和蓝色圆点组成，这些点随机分布在半径固定的灰色圆型背景上。为尽量减少其他无关视觉因素对数量加工的影响，一半的试次匹配了黄蓝颜色点的总面积，一半试次匹配了黄蓝颜色点的平均面积(如 Halberda et al., 2008)。根据韦伯定律，数量间差异的区分主要在于比例大小，而不是绝对差异的大小(Brannon, 2006; Hauser, Tsao, Garcia, & Spelke, 2003)。因此本研究区分了大比例数量和小比例数量两种条件，其中大比例在 2~3 之间，小比例在 1.1~1.5 之间，涉及的数字范围为 1~16。被动数量加工图片的条件设置与主动数量加工图片基本一致，不同之处在于其中有一个随机点为正方形，每张图片的视角为 3°。被动数量加工任务的难度通过改变随机点的视角范围来控制。

2.4 脑电记录与分析

采用国际标准 10 ~ 20 系统扩展的 64 通道的电极帽，用 Brain Product 系统记录 EEG 信号。滤波带通为 0.01~100 Hz 的频率过滤，AC 采样，采样频率为 1000 赫兹/导，所有电极与头皮间的阻抗均小于 10 kΩ。实验过程中以 FCz 作为参考电极，离线分析时采用全脑平均参考。同时记录垂直眼电(VEOG)信号，以监测眼球运动和眨眼。

EEG 数据采用 EEGLAB 软件进行预处理(Delorme & Makeig, 2004)。首先对整段数据进行 1~45 Hz 频段的滤波，然后分段，分段的时间窗为刺激出现前 1000 ms 至刺激出现后 600 ms。由于低频转换需要较长的时间周期，1 Hz 的低频信号至少需要 1000 ms 时长进行转换(Cohen, 2014)，参考前人的时频分析相关参数(如 Zhang, Hu, Hung, Mouraux, & Iannetti, 2012)选取了现有的基线长度。从刺激开始到刺激出现 600 ms 长度选取主要参考前人关于 P2p 研究的时间窗选取参数(如 Park et al., 2015)。采用 EEGLAB 软件中自带的“自动拒绝分段(automatic epoch rejection)”功能进行伪迹去除，伪迹去除参数为软件的默认参数。然后用独立成分分析法(Independent component analysis, ICA)进行眼电和肌电等伪迹的去除。本研究中所涉及的被动数量加工任务是一种内隐的数量加工，在脑电指标上应与主动数量加工同质，因此在脑电的相关分析中应将“任务类型”变量纳入统计分析，以考察该变量对数量加工中脑电指标的影响。总叠加平均之前各条件删除的平均 trial 数分别为主动观看大比例数量 9 ± 6，主动观看小比例数量 9 ± 6，被动观看大比例数量 9 ± 7，被动观看小比例数量 10 ± 7。三因素重复测量方差分析结果显示，保留的试次个数在组内条件之间无显著差异(ps > 0.05)，在组间因素间亦无显著差异，$F(1,58) = 2.11$, $p = 0.15$。

2.4.1 时域分析

根据前人文献，P2p 成分是近似数量加工的一个重要指标(Fornaciai et al., 2017; Hyde et al., 2009, 2012; Libertus et al., 2007; Park et al., 2015)，该成分主要分布在头皮的后部的顶枕联合区，位于视觉加工的背侧通路(Dorsal Stream) (Park et al., 2015)。据此，本研究选取位于枕区电极的 P2p 成分进行 ERP 波形的统计分析。我们计算了时间窗为 175~225 ms 内所选枕区电极的平均波幅，并进行 2(比例类型：大比例数量和小比例数量) × 2(任务类型：主动加工和被动加工) × 2(被试类型：高数学焦虑和低数学焦虑)的重复测量方差分析。

2.4.2 时频分析

在时频分析中，对于每一个被试，我们采用固定 250 ms 汉宁窗的傅里叶变换，将所有试次的 EEG 信号转换为时间–频率的信号。在每一个试次中，用固定汉宁窗的傅里叶变换对时频空间上的每一个数据点进行复杂的时频估计，时间为–1000 ms 至 600 ms (每毫秒 1 个采样点)，频率为 1 至 45 Hz (每赫兹 1 个采样点)。然后将得到的频谱图在每一个频率上进行基线矫正(参考时间段为−900~−100 ms)，矫正公式如下：$ER(t,f)=\frac{F(t,f)-R(f)}{R(f)}$，$F(t,f)$ 表示在时间点 t、频率 f 上信号的强度，$R(f)$ 表示在频率 f 上参考时间段的平均频率。先对 EEG 数据进行单试次分析，再完成多试次的平均，最终获得各条件下的振荡能量。

由于在时频方面近似数量加工的相关研究相对较少，研究对象与本研究不同，且结果不完全统一(Libertus et al., 2009; Park, 2018)，本研究采用了数据驱动的方法，在 1~45 Hz 间所有频段、64 个电极及刺激呈现开始至 600 ms 的时间窗上进行点对点的重复测量方差分析，结合非参数置换检验法(Nonparametric Permutation Testing, Maris & Oostenveld, 2007)寻找感兴趣区(Region of Interest, ROI)。具体有如下 4 步：

(1)对 EEG 时频图上的每一个点进行 2(任务类型：主动数量加工和被动数量加工) × 2(数量比例：

大比例和小比例) × 2(被试类型：高数学焦虑和低数学焦虑)的重复测量方差分析，其中任务类型、数量比例为组内因素，被试类型为组间因素。本研究主要关注数量加工过程，因此在考察被试类型和任务类型的主效应时，需要首先具有数量比例效应，即确认该感兴趣区是与数量加工相关的时频指标，并以此为前提进行寻找有显著的被试类型差异和任务类型差异的感兴趣区。满足以下条件的时频点可进入后续分析：(1)数量比例的主效应显著的 ROI; (2)数量比例主效应显著的前提下被试类型的主效应显著的 ROI; (3)数量比例主效应显著的前提下任务类型的主效应显著的 ROI; (4)数量比例与被试类型交互作用显著的 ROI; (5)数量比例与任务类型交互作用显著的 ROI; (6)以及三因素交互作用显著的 ROI。上述 6 种 ROI 均满足初始 p 值小于 0.01 且包含 30 个连续的时间点。由此得到的每一个时频点上的 F 值可代表效应强度;

(2)为了解决点对点分析中多重比较矫正的问题(Maris & Oostenveld,, 2007)，从上一步分析中得到的在连续的 30 ms 及以上有显著效应的时频点可视为一个 cluster。我们计算满足条件的每个 cluster 上的 F 值的和，得到 sum-F，作为该 cluster 效应强度的指标;

(3)打乱被试类型的标签之后，在时频分布中进行 1000 次置换检验。每次检验做与步骤(1)完全相同的三因素重复测量方差分析，由此可得每个 cluster 在置换检验中的 1000 个 sum-F。根据 1000 个 sum-F 的分布，进行双尾的正态分布检验，考察步骤(2)中得到的 sum-F 在打乱被试类型标签后的分布情况。

(4)为控制虚报率，我们将通过了置换检验，且 sum-F 值最大的 cluster 视作有效的感兴趣区(Region of interest, ROI)进入后续统计分析(Maris & Oostenveld, 2007)。

3　结果

3.1　行为结果

各条件下不同组别的平均准确率和反应时的均值和标准差如表 2 所示。由于被动数量加工任务是要求被试做颜色判断，与数量加工无关，因此不将被动数量加工的相关数据纳入行为分析。我们分别以准确率(ACC)和反应时(RT)为因变量，进行了 2(数量比例) × 2(被试类型)的两因素重复测量方差分析。

表 2　各条件下不同组别的平均准确率和反应时

指标	组别	主动–大比例	主动小比例	被动–大比例	被动–小比例
ACC	HMA	0.91 (0.04)	0.75 (0.05)	0.80 (0.07)	0.78 (0.07)
	LMA	0.92 (0.05)	0.76 (0.06)	0.78 (0.07)	0.74 (0.07)
RT	HMA	620 (112)	736 (132)	619 (116)	648 (110)
	LMA	622 (120)	752 (133)	642 (103)	662 (101)

注：括号中为标准差

当以准确率(ACC)为指标，(1)主效应：数量比例主效应显著(大比例数量 > 小比例数量, $F(1, 58) = 772.50$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.93$)，被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 1.07$, $p = 0.31$。(2)二阶交互：数量比例与被试类型的交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.77$, $p = 0.78$ (见图 3)。参考 Lindskog 等(2017)的分析方法，我们将不同条件的准确率与数学焦虑得分进行了相关分析，结果显示主动大比例($r = –0.16$, $p > 0.05$)和主动小比例($r = –0.15$, $p > 0.05$)条件下准确率均与数学焦虑得分呈负相关趋势。

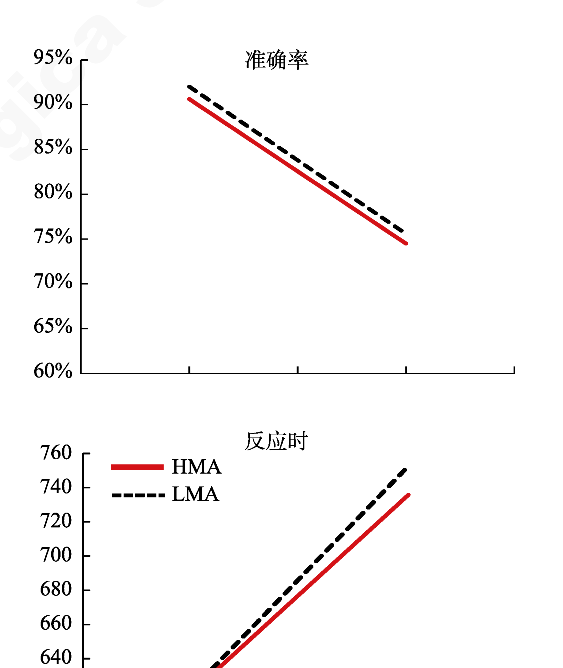


图 3　图中的折线图代表不同条件下行为成绩的均值

对于反应时(RT)指标，剔除了错误反应的试次和 3 个标准差之外的试次之后计算每个被试在每个条件下的 RT：(1)主效应：数量比例主效应显著(大比例数量 < 小比例数量, $F(1, 58) = 364.78$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.86$)，被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.09$, $p = 0.77$; (2)二阶交互：数量比例与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 1.38$, $p = 0.25$ (见图 3)。

3.2　时域结果

观察地形图发现, P2p 成分(175~225 ms)对应的电极分布在头皮后侧(包括 POz, Oz, O1, O2, PO3, PO4, PO7, PO8), 我们以这些电极点上的平均波幅为因变量, 进行 2(数量比例) × 2(任务类型) × 2(被试类型)的重复测量方差分析。结果显示, (1)主效应: 数量比例的主效应显著(大比例数量 > 小比例数量, $F(1, 58) = 5.01$, $p = 0.03$, $\eta_p^2 = 0.08$), 被试类型主效应显著(高数学焦虑组 > 低数学焦虑组, $F(1, 58) = 6.35$, $p = 0.01$, $\eta_p^2 = 0.10$), 任务类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.59$, $p = 0.45$; (2)三阶交互: 三因素三阶交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.14$, $p = 0.71$; (3)二阶交互, 数量比例与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.31$, $p = 0.58$; 任务类型与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 1.01$, $p = 0.32$; 数量比例与任务类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 1.12$, $p = 0.30$。结果见图 4。

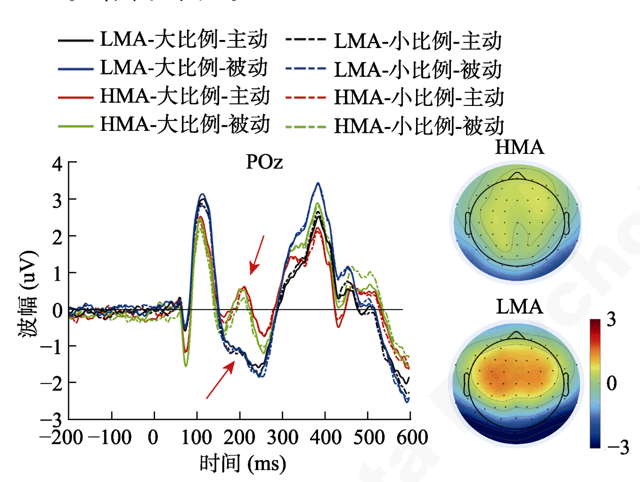


图 4　P2p 成分的地形图和波形图

3.3　时频结果

通过点对点的非参数置换检验, 我们发现: (1)数量比例的主效应显著的 1 个 ROI; (2)数量比例主效应显著的前提下被试类型的主效应显著的 ROI 不存在; (3)数量比例主效应显著的前提下任务类型的主效应显著的 ROI 不存在; (4)数量比例与被试类型交互作用显著的 1 个 ROI; (5)数量比例与任务类型交互作用显著的 1 个 ROI; (6)三因素交互作用显著的 1 个 ROI。

数量比例主效应显著的 ROI 包括了 AF3, AF7, AF8, F1, F3, F6, Fz, F7, C1, C2, C3, C4, C6, Cz, CP1, CP2, CP3, CP4, CPz, P1, P2, Pz 和 P4 电极(1~6 Hz, 296~598 ms), 该 ROI 内神经振荡体现为事件相关同步化(Event related synchronization, ERS)。以该 ROI 内的平均振荡能量作为因变量, 2(数量比例) × 2(任务类型) × 2(被试类型)的重复测量方差分析显示, (1)主效应: 任务类型主效应显著(主动加工 < 被动加工, $F(1, 58) =7.20$, $p = 0.009$, $\eta_p^2 = 0.11$), 数量比例主效应显著(大比例数量 > 小比例数量, $F(1, 58) = 23.40$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.29$), 被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.24$, $p = 0.62$; (2)三阶交互: 三因素三阶交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.36$, $p = 0.85$; (3)二阶交互: 数量比例与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.28$, $p = 0.60$; 数量比例与任务类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.09$, $p = 0.76$; 任务类型与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.77$, $p = 0.38$。但该效应与眼电电极上的能量变化存在高相关, 在控制掉眼电在该时频区域的能量变化之后, 数量比例效应与任务类型的主效应均不再显著。

数量比例与被试类型交互作用显著的 ROI 包括了 P5, PO7, O1 和 Oz 电极(1~5 Hz, 83~217 ms), 该 ROI 内神经振荡体现为事件相关同步化(Event related synchronization, ERS) (见图 5)。以该 ROI 内的平均振荡能量作为因变量, 2(数量比例) × 2(任务类型) × 2(被试类型)的重复测量方差分析显示, (1)主效应: 任务类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.18$, $p = 0.67$; 数量比例主效应边缘显著(大比例数量 > 小比例数量, $F(1, 58) = 3.47$, $p = 0.07$, $\eta_p^2 = 0.06$); 被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0$, $p = 0.98$。(2)三阶交互: 三因素三阶交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.14$, $p = 0.70$。(3)二阶交互: 数量比例与被试类型交互作用显著, $F(1, 58) = 12.17$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.17$。简单效应检验显示, 对于高数学焦虑组大小比例数量能量差异不显著, 对于低数学焦虑组, 大小比例能量差异显著(大比例数量 > 小比例数量, $t(28) = 3.20$, $p = 0.003$, Cohen's $d = 0.59$); 数量比例与任务类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 1.15$, $p = 0.70$; 任务类型与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 2.02$, $p = 0.16$。

数量比例与任务类型交互作用显著的 ROI 包括了 AF3, F1, F2, F4 和 Fz 五个电极(29~37 Hz, 48~171 ms), 该 ROI 内神经振荡体现为事件相关去同步化(Event related desynchronization, ERD)。以该 ROI 内的平均振荡能量作为因变量, 2(数量比例) × 2(任务类型) × 2(被试类型)的重复测量方差分析显示, (1)主效应: 任务类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.01$, $p = 0.91$; 数量比例主效应不显著, $F(1, 58) = 0.27$, $p = 0.60$; 被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 0.11$,

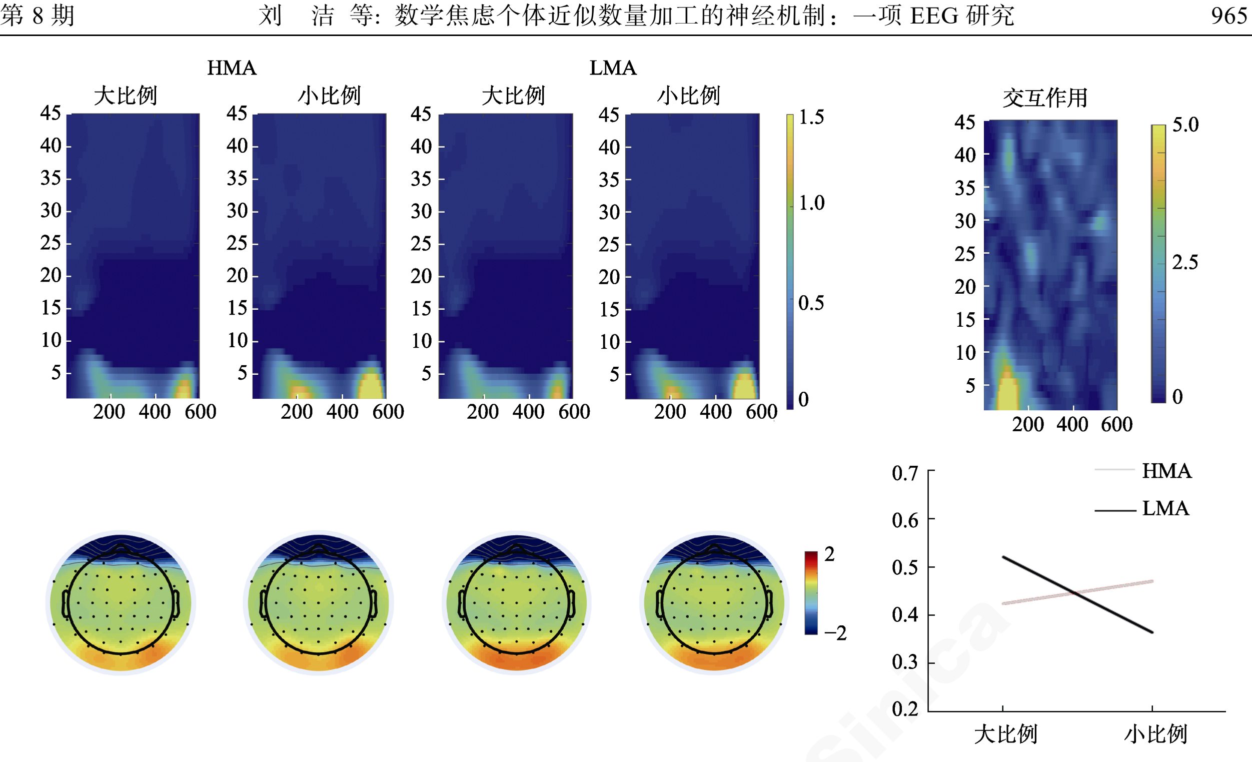


图 5　图中标记在 P5, PO7, O1 和 Oz 电极的 ROI (1~5 Hz, 83~217 ms)上的平均时频分布图、地形图及统计图

p = 0.74。(2)三阶交互: 三因素三阶交互作用显著, $F(1, 58) = 0.01$, $p = 0.91$。(3)二阶交互: 数量比例与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.75$, p = 0.39。任务类型与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.23$, $p = 0.63$。数量比例与任务类型交互作用显著, $F(1, 58) = 21.37$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.28$。简单效应显示, 在大比例数量上, 主动数量加工任务能量显著大于被动数量加工的能量, $t(59) = 2.69$, $p = 0.009$, Cohen's $d = 0.35$; 在小比例数量上, 主动数量加工任务能量显著小于被动数量加工的能量, $t(59) = 3.13$, $p = 0.003$, Cohen's $d = 0.41$。

三因素交互作用显著的 ROI 包括了 P5 和 PO7 两个电极(29~34 Hz, 206~285 ms), 该 ROI 内神经振荡体现为事件相关去同步化(Event related desynchronization, ERD)。以该 ROI 内的平均振荡能量作为因变量, 2(数量比例) × 2(任务类型) × 2(被试类型)的重复测量方差分析显示, (1)主效应: 任务类型主效应显著(主动数量加工 > 被动数量加工, $F(1, 58) = 8.63$, $p = 0.005$, $\eta_p^2 = 0.13$); 数量比例主效应不显著, $F(1, 58) = 0.76$, $p = 0.39$; 被试类型主效应不显著, $F(1, 58) = 1.16$, $p = 0.29$。(2)三阶交互: 三因素三阶交互作用显著, $F(1, 58) = 12.35$, p = 0.001, $\eta_p^2 = 0.18$。简单简单效应显示, 在高数学焦虑组的两种任务类型中, 数量比例效应均不显著($ps > 0.05$); 在低数学焦虑组的主动数量加工任务中, 数量比例效应显著(大比例数量 < 小比例数量, $t(28)=3.39$, $p = 0.002$, Cohen's $d = 0.63$); 低数学焦虑组的被动数量加工任务中, 数量比例效应不显著(见图 6)。(3)二阶交互: 数量比例与被试类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.11$, $p = 0.73$; 数量比例与任务类型交互作用不显著, $F(1, 58) = 0.39$, $p = 0.54$; 任务类型与被试类型交互作用显著, $F(1, 58) = 5.15$, $p = 0.03$, $\eta_p^2 = 0.08$。简单效应检验显示, 高数学焦虑组在主动数量加工任务中的能量显著低于其在被动数量加工中能量, $t(30)=3.65$, $p = 0.001$, Cohen's d = 0.67; 低数学焦虑组在两种类型任务中的能量无显著差异($p > 0.05$)。

4　讨论

本研究考察了数学焦虑个体在近似数量加工任务中的神经电活动特点。我们发现, 在近似数量加工任务中高低数学焦虑无行为指标上的显著差异, 高数学焦虑组在枕区电极上的 P2p 成分平均波幅更大, 在 δ 频段(1~5 Hz)神经振荡上没有数量比例效应, 主动数量加工任务中 β 频段(29~34 Hz)神经振荡上没有数量比例效应, 而 LMA 在两个频段的神经振荡上均有显著的数量比例效应。这些结果为高数学焦虑个体存在近似数量加工能力下降提供了来自 EEG 的证据, 并为"能力减退理论"提供了数据支持。

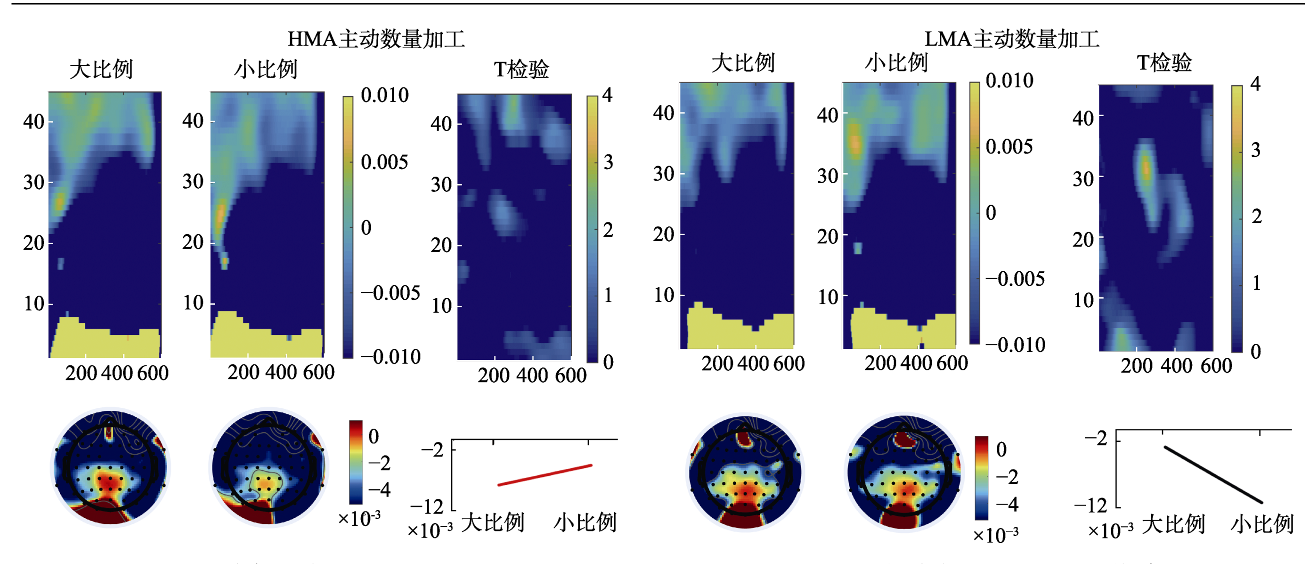


图 6 图中标记在 P5 和 PO7 电极(29~34 Hz, 206~285 ms)上的平均时频分布图、地形图及统计图

本研究的行为结果未发现高低数学焦虑在近似数量加工中行为表现上的差异，但是与 Lindskog 等人(2017)发现的相关方向是一致的，均为负相关。本研究中主动数量加工条件的实验任务与 Lindskog 等(2017)的实验任务完全一致，本研究未得到显著的负相关可能的原因有两个：第一是试次个数较少(192 试次，Lindskog 等(2017)中共有 300 试次)导致实验结果未达到稳定(Lindskog et al., 2017)，第二是任务难度较低——本研究主动条件下一半的试次为大比例数量(1 ∶ 2 和 1 ∶ 3)，而 Lindskog 等(2017)选用的均为小比例数量(3 ∶ 4, 5 ∶ 6, 7 ∶ 8, 9 ∶ 10)——导致在准确率上产生了一定的天花板效应。这一推测可进一步被另外两个研究的结果所证实：Dietrich 等(2015)对 61 名高低数学焦虑个体进行行为测试，该实验共 400 个试次，设置的比例为 1 ∶ 2 至 9 ∶ 10 之间，也低于 Lindskog 等(2017)，该研究也未发现高低数学焦虑个体在近似数量加工成绩上的显著差异。Colomé (2019)用非符号数量判断任务测试 56 名健康大学生，同样未发现高低数学焦虑组在行为成绩上的组间差异，该研究仅 96 个试次，设置的比例为 1 : 1.1:至 1 : 2 之间。结合对本研究与上述研究的实验设置我们认为，试次的个数及任务的难度的差异可能是本研究在主动条件下两组被试在准确率上的组间差异未达统计显著的原因。但由于本实验所发现的 EEG 指标的理论意义需要大小数量比例对比来进行验证，以确认该指标与近似数量加工相关，且较多的实验试次耗时过长容易导致被试的疲劳而影响实验效果，因此本研究为未能同时考量行为指标与 EEG 指标，该推测还有待在未来研究中进一步验证。

前人研究提示高数学焦虑群体在完成数学任务会激活一些与数量加工无关的脑区激活或 ERP 成分，如会激活杏仁核、脑岛等情绪、疼痛加工脑区(如 Lyons & Beilock, 2011; Young, Wu, & Menon, 2012)，或在注意加工相关的 P2/P3 成分的波幅上存在组间差异(如 Núñez-Peña & Suárez-Pellicioni, 2015; Liu, Li, Peng, Feng, & Luo, 2019)。那么本研究中 P2p 成分是否反映着近似数量加工过程，能否与注意相关的 P2 成分相区分？首先，本研究中 P2p 成分集中于枕区，而 Núñez-Peña 和 Suárez-Pellicioni (2015)中的 P2 成分的组间差异广泛地分布在额区和顶区；其次，本研究中枕区 P2p 成分的平均波幅可被数量比例所调节，大比例数量的 P2p 波幅显著大于小比例数量，这与相似范式的 Libertus 等人(2007)及 Hyde 等(2012)研究结果的方向一致。据此可推测本研究中 P2p 成分波幅的组间差异的确反映着近似数量的加工过程，而不是注意加工的组间差异。Park 等(2015)采用的是被动观看点阵的任务，无需被试反应，发现 P2p 波幅会随着数量的增加而增加。上述几个研究结果提示 P2p 波幅与近似数量加工的精确度有关，精确度越高 P2p 波幅越大。P2p 波幅在高数学焦虑人群中显著增强，且在被试类型和数量比例之间无显著的交互作用，在被试类型和任务类型之间也无显著的交互作用，可以解释为高数学焦虑人群的近似数量加工的整体精确度有所下降。

本研究发现的显著的被试类型与数量比例的交互作用的枕区 P5, PO7, O1 和 Oz 电极的 1~5 Hz 上 ERS 出现在刺激呈现后 83~217 ms，这个频段与 Park (2018)中发现的 1 Hz 的频段和枕区电极(Oz 和

PO8)的发现相吻合。Park (2018)认为在 PO8 上的低频神经振荡能量被数量大小所调节的效应来自于脑电的 P2p 成分，而 Oz 上的数量效应来自于更早期的视觉加工 C1 成分。C1 成分是被视觉刺激诱发的第一个脑电成分，潜伏期一般是 60~100 ms (Di Russo, Martínez, Sereno, Pitzalis, & Hillyard, 2002)，起源于初级视觉皮层(Fornaciai et al., 2017)。Fornaciai 等(2017)发现在近似数量加工时，在 50~125 ms 中诱发的脑电成分存在与 C1 成分类似的特点：当刺激在上下视野切换呈现时会该成分会出现极性的变化。该成分的波幅也可以显著的被数量比例所调节，由此可推测，在近似数量加工的早期阶段存在着一个来自初级视觉皮层的早期视觉成分也在加工数量相关的内容。而本研究中 1~5 Hz 的神经振荡在时间窗上与该成分有重合，同时在低数学焦虑组中也能被数量比例调节，由此我们推测 1~5 Hz 神经振荡可能来自于 Fornaciai 等人(2017)研究中发现的这一早期视觉成分。但由于 C1 成分与低频神经振荡间的关系尚未有研究证实，且本研究的数据不能支持这一推断，未来还需要结合严格的实验设计来证明 1~5 Hz 的神经振荡是否与 C1 成分有关。本研究在该频段上低数学焦虑组的大比例数量的能量显著大于小比例数量，而高数学焦虑组没有显著的数量比例效应。这表明高数学焦虑个体在数量加工的早期过程对数量比例不敏感，没有对刺激的数量信息进行充分的加工。在三阶交互作用的简单简单效应分析中，我们也发现在枕区电极(P5 和 PO7)的 β 频段 ERD (29~34 Hz, 206~285 ms)，在主动数量加工任务中，高数学焦虑组没有表现出显著的数量比例，而低数学焦虑组的大比例数量的能量显著低于小比例数量的能量。由于 beta 频段活动与自上而下的认知加工相关(见综述 Engel, Fries, & Singer, 2001)，β 频段上的数量比例效应可能体现着自上而下的数量加工的特点，高数学焦虑组在近似数量加工中自上而下的认知控制中可能存在问题。这是首次发现的近似数量加工的数量比例效应在高频段的 EEG 指标。

对于任务类型变量，两种类型的任务都能激活 P2p，且该成分的波幅在主动数量加工和被动数量加工两种类型的任务上没有差异。以往研究分别采用了主动数量加工(Libertus et al., 2007)或被动数量加工任务(如 Hyde et al., 2009, 2011, 2012; Park et al., 2015; Fornaciai et al., 2017)。这两种任务均能激活 P2p 成分，但没有研究比较在不同任务中 P2p 成分波幅的差异。本研究同时采用了这两类任务，发现 P2p 成分的波幅在两类任务中没有显著差异，且与数量大小比例也没有显著的交互作用，表明 P2p 成分是在近似数量加工中自动激活的，可以完全独立于实验任务。由于在婴幼儿、动物实验中常采用被动数量加工范式，但该范式缺少相应的行为反应指标，现有结果可为被动数量加工范式的可靠性提供数据支持。存在显著的任务类型效应的时频指标体现在 2 个 ROI 上：第一个 ROI 是三阶交互作用显著的 ROI 中主动数量加工条件下神经振荡能量显著大于被动数量加工条件，前文讨论到在该 ROI 内的 β 频段 ERD 可能与数量的自上而下的加工有关，该结果可解释为主动数量加工条件中自上而下的加工更强，因此振荡的能量更强；第二个 ROI 是数量比例与任务类型交互作用显著的额区电极 ROI (29~37 Hz, 48~171 ms)中，我们发现在大比例数量上，主动数量加工任务能量显著大于被动数量加工的能量，在小比例数量上模式则相反，表明支撑两种不同的任务的数量加工的 EEG 指标还是存在差异的，这一差异发生在额区的 beta 频段可能也提示着自上而下的数量加工上的差异。

本研究的结果提示在无需工作记忆支持的近似数量加工任务中高数学焦虑的 EEG 指标也存在异常，表明“干扰理论”是不准确的。以往支持“能力减退理论”的证据发现主要来自两方面：一方面关于数学焦虑发生发展的研究(Sorvo et al., 2019; Wang et al., 2014)。近期的一项纵向研究通过交叉滞后分析证明了低数学能力是因，高数学焦虑是果(Sorvo et al., 2019)。另一方面是高数学焦虑个体基本的数量加工能力的相关研究(Lindskog et al., 2017; Maloney et al., 2010)。其基本逻辑是个体在底层的数学加工如基本数量/空间加工上的能力下降导致了高数学焦虑。现有研究发现高数学焦虑个体在符号表达的数量加工能力低于低数学焦虑个体(如 Dietrich et al., 2015; Malonely et al., 2010, 2011; Núñez-Peña & Suárez-Pellicioni, 2014)。近似数量加工系统是后期习得的数量加工系统的重要组成部分，具有不受一般认知加工及教育文化因素干扰等特点(Sullivan et al., 2016)，相对于符号表达的数量加工，个体在近似数量系统的不精确表征更能反映被试的先天特性。Lindskog 等(2017)发现数学焦虑水平与非符号的数量加工能力(即近似数量加工能力)之间存在显著的负相关。本研究在 Lindskog 等(2017)的基础上进一步提供了神经电生理的证据：P2p 成分

上显著的组间差异以及低频段(1~5 Hz)和主动数量加工中的高频段(29~34 Hz)上的交互作用均表明，高数学焦虑个体在近似数量的加工上存在问题。高数学焦虑人群在高级的数学加工中表现较差，可能是由于个体近似数量加工能力下降导致了高数学焦虑，进而使得个体接受正式的数学教育之后学习时间减少、学习动机降低，并进一步影响其数学表现。

本研究未在行为层面上发现高低数学焦虑的显著组间差异，这是本研究的不足之处。但该结果也可进一步说明，即使行为成绩没有显著差异，高低数学焦虑在进行近似数量加工时仍会在与数量加工相关的神经指标上表现出异常。综上所述，本研究为数学焦虑个体近似数量加工的能力下降的原因提供了来自 EEG 的证据，支持了数学焦虑与数学能力间关系的“能力减退理论”假说。未来研究中还需增加实验难度，结合行为结果继续验证本研究的发现；同时还应从纵向研究的角度探讨数学焦虑、近似数量加工和数学表现三者间的相互作用，以揭示数学焦虑、近似数量加工和数学成绩三者的因果关系。

参 考 文 献

Alexander, L., & Martray, C. (1989). The development of an abbreviated version of the Mathematics Anxiety Rating Scale. *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, *22*(3), 143–150.

Ashcraft, M. H. (2002). Math anxiety: Personal, educational, and cognitive consequences. *Current Directions in Psychological Science, 11*(5), 181–185.

Ashcraft, M. H., & Kirk, E. P. (2001). The relationships among working memory, math anxiety, and performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(2), 224–237.

Ashcraft, M. H., & Krause, J. A. (2007). Working memory, math performance, and math anxiety. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*(2), 243–248.

Bates, M. E., & Lemay, E. P. (2004). The d2 test of attention: construct validity and extensions in scoring techniques. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *10*(3), 392–400.

Brannon, E. M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology*, *16*(2), 222–229.

Brannon, E. M., Jordan, K. E., & Jones, S. M. (2010). Behavioral signatures of numerical cognition. In M. L. Platt, A. A. Ghazanfa (Eds.). *Primate neuroethology* (pp.144–159), Oxford University Press.

Carey, E., Hill, F., Devine, A., & Szücs, D. (2016). The chicken or the egg? The direction of the relationship between mathematics anxiety and mathematics performance. *Frontiers in Psychology*, 6, 1987.

Cohen, M. X. (2014). *Analyzing neural time series data: Theory and practice*. Cambrige, Massachusetts, the MIT press.

Colomé, À. (2019). Representation of numerical magnitude in math-anxious individuals. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*(3), 424–435.

Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, *134*(1), 9–21.

Dietrich, J. F., Huber, S., Moeller, K., & Klein, E. (2015). The influence of math anxiety on symbolic and non-symbolic magnitude processing. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1621.

Di Russo, F., Martínez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S., & Hillyard, S. A. (2002). Cortical sources of the early components of the visual evoked potential. *Human Brain Mapping, 15*(2), 95–111.

Ekstrom, R. B., Dermen, D., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests* (Vol. 102). Princeton, NJ: Educational Testing Service.

Engel, A. K., Fries, P., & Singer, W. (2001). Dynamic predictions: Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience, 2*(10), 704–716.

Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations-signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, *20*(2), 156–165.

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175–191.

Fornaciai, M., Brannon, E. M., Woldorff, M. G., & Park, J. (2017). Numerosity processing in early visual cortex. *NeuroImage*, *157*, 429–438.

Halberda, J., Mazzocco, M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, *455*(7213), 665–668.

Hauser, M. D., Tsao, F., Garcia, P., & Spelke, E. S. (2003). Evolutionary foundations of number: spontaneous representation of numerical magnitudes by cotton-top tamarins. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, *270*(1523), 1441–1446.

Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All numbers are not equal: an electrophysiological investigation of small and large number representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(6), 1039–1053.

Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2012). Spatiotemporal dynamics of processing nonsymbolic number: An event-related potential source localization study. *Human Brain Mapping*, *33*(9), 2189–2203.

Hyde, D. C., & Wood, J. N. (2011). Spatial attention determines the nature of nonverbal number representation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(9), 2336-2351.

Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(25), 10382–10385.

Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2009). Behavioral and neural basis of number sense in infancy. *Current Directions in Psychological Science*, *18*(6), 346–351.

Libertus, M. E., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2007). Electrophysiological evidence for notation independence in numerical processing. *Behavioral and Brain Functions*, *3*(1), 1.

Lindskog, M., Winman, A., & Poom, L. (2017). Individual differences in nonverbal number skills predict math anxiety. *Cognition*, *159*, 156–162.

Liu, J., Li, J., Peng, W., Feng, M., & Luo, Y. (2019). EEG correlates of math anxiety during arithmetic problem solving: Implication for attention deficits. *Neuroscience Letters*, *703*, 191–197.

Lyons, I. M., & Beilock, S. L. (2011). Mathematics anxiety: separating the math from the anxiety. *Cerebral Cortex*, *22*(9), 2102–2110.

Maloney, E. A., Ansari, D., & Fugelsang, J. A. (2011). Rapid communication: the effect of mathematics anxiety on the processing of numerical magnitude. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *64*(1), 10–16.

Maloney, E. A., Risko, E. F., Ansari, D., & Fugelsang, J. (2010). Mathematics anxiety affects counting but not subitizing during visual enumeration. *Cognition, 114*(2), 293–297.

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG and MEG data. *Journal of Neuroscience Methods, 164*(1), 177–190.

Núñez-Peña, M. I., & Suárez-Pellicioni, M. (2014). Less precise representation of numerical magnitude in high math-anxious individuals: An ERP study of the size and distance effects. *Biological Psychology*, *103*, 1767–183.

Núñez-Peña, M. I., & Suárez-Pellicioni, M. (2015). Processing of multi-digit additions in high math-anxious individuals: psychophysiological evidence. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1268.

OECD. (2013). *PISA 2012 Results: Ready to learn: Students' engagement drive and self-beliefs* (Volume III). PISA, OECD Publishing.

Park, J. (2018). A neural basis for the visual sense of number and its development: A steady-state visual evoked potential study in children and adults. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *30*, 333–343.

Park, J., DeWind, N. K., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2015). Rapid and direct encoding of numerosity in the visual stream. *Cerebral Cortex*, *26*(2), 748–763.

Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (1998). *Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 3, The Standard Progressive Matrices*. Oxford, England: Oxford Psychologists Press/San Antonio, TX: The Psychological Corporation.

Sorvo, R., Koponen, T., Viholainen, H., Aro, T., Räikkönen, E., Peura, P., … Aro, M. (2019). Development of math anxiety and its longitudinal relationships with arithmetic achievement among primary school children. *Learning and Individual Differences*, *69*, 173–181.

Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R., Vagg, P. R., & Jacobs, G. A. (1983). *Manual for the state-trait anxiety scale*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologists Press.

Sullivan, J., Frank, M. C., & Barner, D. (2016). Intensive math training does not affect approximate number acuity: Evidence from a three-year longitudinal curriculum intervention. *Journal of Numerical Cognition, 2*(2), 57–76.

Wang, Z., Hart, S. A., Kovas, Y., Lukowski, S., Soden, B., Thompson, L. A., … Petrill, S. A. (2014). Who is afraid of math? Two sources of genetic variance for mathematical anxiety. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 55*(9), 1056–1064.

Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, *8*(1), 88–101.

Young, C. B., Wu, S. S., & Menon, V. (2012). The neurodevelopmental basis of math anxiety. *Psychological Science, 23*(5), 492–501.

Zhang, Z. G., Hu, L., Hung, Y. S., Mouraux, A., & Iannetti, G. D. (2012). Gamma-band oscillations in the primary somatosensory cortex—a direct and obligatory correlate of subjective pain intensity. *Journal of Neuroscience, 32*(22), 7429–7438.

Zhou, X., Wei, W., Zhang, Y., Cui, J., & Chen, C. (2015). Visual perception can account for the close relation between numerosity processing and computational fluency. *Frontiers in Psychology, 6*, 1364.

The neural mechanism of approximate number processing for mathematical anxious individuals: An EEG study

LIU Jie[1,2,3]; LI Jinqi[1,2]; SHEN Chaoran[4]; HU Xiaohui[1,2]; ZHAO Tinghao[5]; GUAN Qing[1,2]; LUO Yuejia[1,2,3]

([1] *Center for Brain Disorders and Cognitive Neuroscience, Shenzhen University, Shenzhen* 518060, *China*)

([2] *School of Psychology, Shenzhen University, Shenzhen* 518060, *China*)

([3] *Shenzhen Institute of Neuroscience, Shenzhen* 518060, *China*)

([4] *Department of Education, Changzhi University, Changzhi* 046000, *China*)

([5] *Department of Cognitive Science, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, USA*)

Abstract

The approximate number system (ANS) underlies the ability to approximately represent numerical magnitude or to estimate the number of a quantity without counting. ANS acuity is a reliable predictive factor of mathematical achievements and is most likely not influenced by educational or cultural factors of general cognitive processing. It is well established that individuals with mathematics anxiety (MA) perform normally in general cognitive tasks but significantly below-average in mathematical tasks such as numerical magnitude processing, computation and mathematical problem solving. Previous behavioral study reported significant negative correlations between MA level and ANS acuity but it remained unclear whether MA individuals are deficient in their ANS functioning.

The current study explored the approximate number processing in individuals with mathematics anxiety at a neural level and gathered electrophysiological evidences for ANS deficiency in MA individuals. We selected 31

individuals with high math anxiety and 29 individuals with low math anxiety who were matched for mean general intelligence, rapid visual perception ability, visual searching ability and mean general anxiety level. The participants completed a dot array task both actively and passively as their electroencephalogram (EEG) data were recorded. In the active dot array task, the participants were required to make judgements on the relative quantities of blue and yellow dots while the ratio of the dots were manipulated to be high or low. In the passive viewing task, the participants were required to complete an irrelevant task to ensure that proper attention was paid to the stimuli while the ratio was also manipulated.

We found that the behavioral performances of the two groups were comparable in both active and passive viewing tasks. However, event-related potential (ERP) analysis revealed that the high anxiety group had larger P2p amplitudes at the occipital electrodes than the low anxiety group in both active and passive viewing tasks. Furthermore, time-frequency analysis was performed and significant ratio effects were found in the low anxiety group in δ band (1~5 Hz) event-related synchronization (ERS) and β band (29~34 Hz) event-related desynchronization (ERD) while no ratios effects were found in the low anxiety group.

The current study provided electrophysiological evidences for ANS deficiencies in individuals with MA. The findings of this study have important theoretical implications for the causes of the impaired mathematical abilities in MA individuals as well as for effective interventions for MA.

Key words mathematics anxiety; approximate number system; EEG; time-frequency analysis